

文章编号: 0253-2239(2005)04-525-8

对主动抛光盘在加工、测量状态下盘面的变形 及提升的数学分析*

高必烈

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

摘要: 用主动抛光盘磨制非球面是一个动态的过程, 必须保证在计算机控制下, 主轴的移动、旋转, 和抛光盘的旋转、倾斜、变形及升降, 以及主镜的旋转都步调一致。推导出在模式中诸要点的位置、速度、加速度和时间的关系, 并根据所加工的口径 $\phi 910$ mm, 焦比为 $F/2$ 的抛物面主镜参量和所用主动抛光盘的参量分析: 1) 主动抛光盘基板的变形特性, 即它的变形量、变形的速度和加速度, 以及近似公式与精确公式之间的差异; 2) 主动抛光盘背面的三个提升点运动规律, 即它的升降量、升降的速度和加速度; 3) 主动抛光盘的变形量和它在差分变压器式线性微位移传感器(LVDT)测试架上所测得的测量量之间的关系; 4) 分析主动抛光盘的变形与提升的速度与加速度和抛光盘沿横梁的运动速度 V_1 以及抛光盘自身的转速 V_2 之间的关系和特性。此分析是主动抛光盘的数学基础, 它为主动抛光盘的机械和电控设计提供了技术依据, 为实现计算机控制下的 6 轴联动提供了保证。

关键词: 应用光学; 非球面制造; 主动抛光盘; 抛光盘变形分析; 抛光盘升降与倾斜分析

中图分类号: TH74 文献标识码: A

The Mathematical Analysis for the Active Lap Deformation on Proceeding Condition

Gao Bilie

(National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

Abstract: Using active lap to polish an aspherical mirror is a dynamic proceeding, so the translation and spin of spindle, the spin, tilt, deformation, and rise and fall of the lap; and the spin of the primary mirror all together must be kept in step, under the computer control. According to author's $\phi 910$ mm, $F/2$, parabolic primary mirror and our active lap parameters, the author analyzes the deformation character of active lap base, that is, its deforming quantity, deforming velocity and deforming acceleration, and the difference between precision deformation and approximative analysis; the distance of rising and falling on 3-hoist points of the stressed lap back, that is, its moving velocity and acceleration; the relationship between reality deforming quantity of stressed lap and the measuring quantity using LVDT on measuring shelf. Also the relationship and features about deformation and hoisting movement with V_1 (lap moving velocity along the crossbeam) and V_2 (lap spinning speed around its spindle) are analyzed. Based those analyses, the author can guide to design mechanics and electronics of active lap, and guarantee all these movement keep in step.

Key words: applied optics; aspherical manufacture; active lap; analysis of lap's deformation; analysis of lap's tilt; rise and fall

1 引 言

主动抛光盘^[1~3](Stressed lap)技术是近年来发

展起来的一种能根据需要将抛光盘主动变形来磨制大的深度非球面光学表面的计算机控制的磨镜技

* 国家自然科学基金(19633020)资助课题。

作者简介: 高必烈(1947~), 男, 上海市人, 研究员, 国家天文台南京天文光学技术研究所镜面室总工程师。

E-mail: blgao@niaot.ac.cn

收稿日期: 2004-03-22; 收到修改稿日期: 2004-08-18

术。主动抛光盘做好后,必须测量其在镜面上不同中心距及盘面不同转角时其盘面的变形。具体的测量工作在主动抛光盘机电联调好后及差分变压器式线性微位移传感器(Linearly variable differential transformer, LVDT)测试架做好后进行,即要使盘面的变形等于理论计算的数值。因此我们必须事先算出或实时求出主动抛光盘在不同位置的偏轴非球面形状。并籍此考虑盘面的机械、电器特性去编制 Lookup Table 表,作为盘面变形的开环控制依据。

另外主动抛光盘在工作中是动态的,即盘面在旋转的同时其中心还要沿着横梁来回运动,同时盘面随着中心点在镜面上的不同位置还要倾斜,也就是说,主动抛光盘在旋转(同时变形)的过程中还有一个提升/下降的运动。假定主动抛光盘沿横梁的运动速度为 V_1 (mm/s),主动抛光盘的自身旋转速度为 V_2 (r/min),我们来分析:1) 盘正面某点(柏油面上与抛物面接触的某点)随时间变化时应有的变形量及变形的速度和加速度,2) 盘背面上某一点(例如三提升点)随时间的高度变化量(提升/下降)及其变化的速度和加速度;3) 在主动抛光盘中心点的法线方向上看盘面的精确变形量并与与前面的近似公式相比较;4) 用现在的 LVDT 的测量装置所测得的测量量与盘面自身变形量之间的关系;5) 盘面的变形和提升运动的特点。

2 盘面变形的定性分析

如图 1 所示,以被加工的抛物面顶点为坐标原点,以主动抛光盘沿横梁的移动方向为 X 轴方向建立三维直角坐标系 $O-XYZ$,在本文的分析中此坐标系是不随时间、主轴位置和转角等改变的。在此坐标系中抛物面的方程为

$$Z = (X^2 + Y^2)/(2R_{\text{apex}}), \quad (1)$$

式中 R_{apex} 为抛物面的顶点曲率半径。此外以主动抛光盘中心点为坐标原点,以 X 轴的正方向为初始方

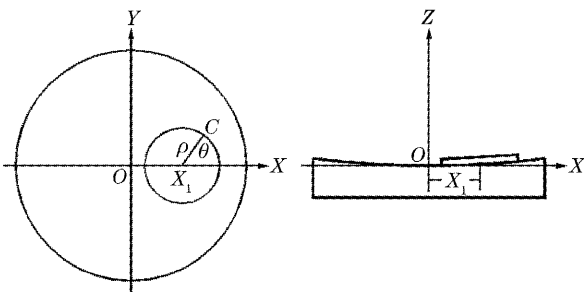


图 1 为镜面和抛光盘建立坐标系

Fig. 1 Set up coordinate system for Mirror and Lap

向建立极坐标系 (ρ, θ) , 同样按规定,以逆时针方向转角为正。假定主动抛光盘中心的初始位置为 X_0 、 Z_0 ($Z_0 = X_0^2/2R_{\text{apex}}$), 盘上某点的坐标为 ρ_i 、 θ_{0i} (θ_{0i} 为某点的初始相位), 如前所叙主动抛光盘沿横梁的移动速度为 V_1 、主动抛光盘本身的旋转速度为 V_2 , 经时间 t 后,主动抛光盘中心点的坐标为

$$\begin{cases} X_i = V_1 t + X_0, \\ Y_i = 0, \\ Z_i = (V_1 t - X_0)^2 / (2R_{\text{apex}}), \end{cases} \quad (2)$$

盘上某点的极坐标为

$$\begin{cases} \rho_i = \rho_i, \\ \theta_i = V_2 t + \theta_{0i}, \end{cases} \quad (3)$$

因而盘上 C 点(柏油面上)在 $O-XYZ$ 坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} X_C = F_1(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \\ Y_C = F_2(V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \\ Z_{C \text{ paraboloid}} = F_3(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t). \end{cases} \quad (4)$$

在分析前我们先做一个假定,即主动抛光盘所选用的比较球面与抛物面在主动抛光盘的中心点 (X_1, Y_1, Z_1) 相切,也就是说,比较球面的球心在抛物面此点的法线上。此外在先前的计算分析中我们发现,当比较球面的曲率半径 R_{compare} 的取值在一定的范围内时(例如从抛物面的顶点曲率半径 R_{apex} 到抛物面的边缘曲率半径 R_{border}),主动抛光盘变形的最大偏差量 ($P-V = P_{\text{peak}} - V_{\text{valley}}$) 是恒定的。所以对盘面的变形来说,无论选取什么样的比较球面 R_{compare} (在一定的范围内),主动抛光盘所要完成的绝对变形量是恒定的。在此我们不妨取 $R_{\text{compare}} = R_{\text{apex}}$, 这样在整个加工过程中,主动抛光盘都是在此基础上的放松。也就是说它与比较球面相比它的变形方向都是一致的。为了简化起见,我们在此分析中就取 $R_{\text{compare}} = R_{\text{apex}}$ 。

于是我们可以求得抛光盘顶点 $(X_1, Y_1=0, Z_1)$ 的法线方程,在此点相切的比较球面方程和原抛物面方程,因而也就可以知道在抛光盘上任一点 C 的变形量 ΔZ 。

即板的变形量为

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\text{approximate}} &= Z_{C \text{ sphere}} - Z_C = \\ &F_4(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \end{aligned} \quad (5)$$

则板的变形速度为

$$\partial(\Delta Z)/\partial t = F'_4(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \quad (6)$$

同样,板的变形加速度为

$$\partial^2(\Delta Z)/\partial t^2 = F''_4(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \quad (7)$$

3 盘背面上 C 点的上下位置变化、运动速度和加速度

如图 2 所示,主动抛光盘背面的中心点(主轴与盘面联结的联轴节的中心)在横梁上的起始位置为 X_0 ,其运动速度为 V_1 ,经时间 t 后,到达 A 点,即为 X_A ,若主动抛光盘的厚度为 d (联轴节的中心到柏油顶点 B 的距离),则 $X_B = X_A(1 + d/R_{\text{apex}})$ (忽略掉抛物面上 X_A 和 X_B 之间的斜率误差,这是一个高阶小量,可以忽略)。在垂直于 B 点的法线的平面上的主动抛光盘背面上的 C 点极坐标为 (ρ_i, θ_i) ,主轴的转动速度为 V_2 ,故经时间 t 后,得到以下关系:

$$\begin{cases} X_A = V_1 t + X_0, \\ X_B = (V_1 t + X_0)(1 + d/R_{\text{apex}}), \\ Z_B = X_B^2 / 2R_{\text{apex}} = \\ (V_1 t + X_0)^2 (1 + d/R_{\text{apex}})^2 / (2R_{\text{apex}}), \end{cases}$$

因为在 B 点抛物面的斜率为

$$\tan \alpha = (V_1 t + X_0)(1 + d/R_{\text{apex}}) / R_{\text{apex}},$$

令

$$W = 1 + d/R_{\text{apex}}, \quad A = \sqrt{R_{\text{apex}}^2 + X_A^2 W^2},$$

所以

$$\sin \alpha = X_A W / A, \quad \cos \alpha = R_{\text{apex}} / A,$$

$$Z_A = Z_B + d \cos \alpha = X_A^2 W^2 / (2R_{\text{apex}}) + d R_{\text{apex}} / A,$$

经时间 t 后,板背面 C 点的极坐标为: $(\rho_i, V_2 t + \theta_{0i})$, 而 C 点在 O-XYZ 坐标系中的坐标为

$$X_C = F_5(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t),$$

$$Y_C = F_6(V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t),$$

又因为 C 点在过 A 点平行于 B 点切平面内,因而求得 C 点的 Z 坐标为

$$Z_C = F_7(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \quad (8)$$

这就是板背面某点 C 的高度位置与时间 t 的关系。而

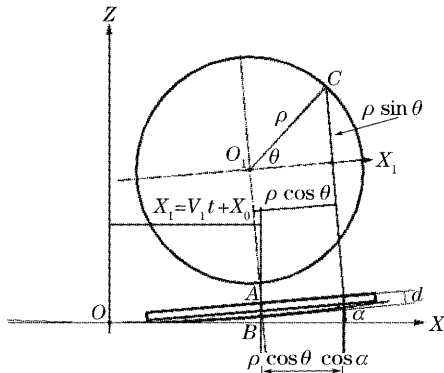


图 2 盘上诸关键点的数学关系

Fig. 2 Mathematical relationship about important points of lap

C 点的运动速度为

$$\frac{\partial Z_C}{\partial t} = F'_7(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t), \quad (9)$$

而 C 点的运动加速度为

$$\frac{\partial^2 Z_C}{\partial t^2} = F''_7(V_1, V_2, \rho_i, \theta_{0i}, t). \quad (10)$$

4 在主动抛光盘中心点的法线方向分析盘面的精确变形

如图 2 所示,已知基本关系式为

$$\begin{cases} X_A = V_1 t + X_0, \\ X_B = X_A W, \\ Y_B = 0, \\ Z_B = X_B^2 / (2R_{\text{apex}}), \end{cases}$$

在主动抛光盘中心点 B 的切平面上的某点 C' (某一传感器,从 B 点的法线方向看与板背面的 C 点重合) 的坐标为(在 O-XYZ 中)

$$\begin{cases} X_C = X_B + \rho_i \cos \theta_i \cos \alpha = X_B + \frac{\rho_i R_{\text{apex}} \cos \theta_i}{A}, \\ Y_C = \rho_i \sin \theta_i, \\ Z_C = Z_B + (X_C - X_B) \tan \alpha = \\ Z_B + \frac{\rho_i R_{\text{apex}} \cos \theta_i}{A} \times \frac{X_B}{R_{\text{apex}}} = Z_B + \frac{\rho_i X_B \cos \theta_i}{A}, \end{cases}$$

所有的传感器都是垂直于过 B 点的切平面,如前所叙,求得过主动抛光盘中心 B 点且与抛物面相切的比较球面的方程后,再求得每一个传感器与抛物面和比较球面的交点,此两交点之间的距离,即为铝板在此点应有的精确变形量。即

$$\Delta Z_{\text{accurate}} = [(Z_{\text{sphere}} - Z_{\text{asphere}})^2 + (X_{\text{sphere}} - X_{\text{asphere}})^2]^{1/2}, \quad (11)$$

而近似变形偏离精确变形之差为

$$\Delta(\Delta Z) = \Delta Z_{\text{approximate}} - \Delta Z_{\text{accurate}}. \quad (12)$$

5 盘面变形量与测量量的关系

图 3 所示为主动抛光盘在 LVDT 测试架子上时从盘背面由上往下看时所看到的情况。O₁ 为极坐标的极点。O₁X₁ 为极坐标的极轴,其方向在 O-XYZ 坐标系的 O-XY 平面的投影与 OX 方向重叠一致。16 个位移传感器的编号为 L1-L16;支撑点 S1~S3 为与 LVDT 连接在一起的均布在 φ400 圆上的,定位主动抛光盘的三个支撑点;提升点 H1~H3 为由主轴去提升主动抛光盘的盘背面的三个点,它均布在 φ422 的圆上。拉力推动器 P1~P12 为均布在主动抛光盘周

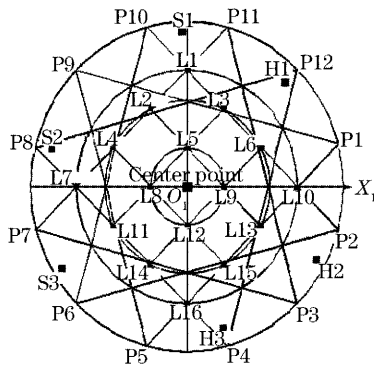


图3 在测试架上时,有关诸点在盘面上的分布
Fig. 3 The distribution of all points on stress lap on measuring shelf

边的12个拉力促动器,组成4个正三角形。对16个LVDT的分布进行分析,我们能发现1,7,16,10这4个LVDT均布在 $\phi 225\sqrt{2}\text{ mm}=\phi 318\text{ mm}$ 的圆上(它相当于主动抛光盘直径的0.7071),由于主动抛光盘变形时的边缘效应,根据国外的经验,柏油区域最多也只能达到主动抛光盘直径的0.7左右,而我们的柏油盘也是以此为外缘,故仅在此设4个LVDT;2,4,11,14,15,13,6,3这8个LVDT分布在 $\phi 75\sqrt{10}\text{ mm}=\phi 237\text{ mm}$ 的圆上(它相当于主动抛光盘直径的0.5270),这是柏油盘区域与旋转时的线速度之积最大的区域,也是修改抛物面最重要的区域,故安排8个LVDT;5,8,9,12这4个LVDT分布在 $\phi 75\sqrt{2}\text{ mm}=\phi 106\text{ mm}$ 的圆上(它相当于主动抛光盘直径的0.2357),柏油区域较小,旋转时线速度也较小;从另一个角度看16个LVDT还分布成 4×4 的阵,因此这样一个LVDT的测试分布对目前的主动抛光盘来说还是比较合理的。由于主轴的转速为 V_2 ,经时间 t 后,盘面上某点的角度为 $\theta_1 = V_2 t + \theta_{0i}$;由于在我们的结构中LVDT与盘面的相对位置是固定不动的,所以当主动抛光盘转动时,我们只有认为LVDT测试架也是以同样的角速度在旋转,以此来适应它,并测量它。LVDT所测得的值应是主动抛光盘的背面的中心在不同的横梁位置时,主动抛光盘上某点在不同的转角时它的变形量的测量值,也就是在此状态下比较球面与抛物面之间偏差量(变形量)的测量值。主动抛光盘面的变形量与测量量之间有一个平移和倾斜的关系。

图4表明二者之间的平移关系,虚线为主动抛光盘所取的比较球面在测量状态下时变形前的状况,实线为在某一位置时主动抛光盘变形后的状况。

根据加工状态下的实际情况,两曲面在主动抛光盘的顶点处相切。点划线是加工状态下的主动抛光盘变形前的状况,它实际上是虚线向上平移了一段距离,这段距离等于点划线和虚线在 $\phi 400\text{ mm}$ 支撑环带上的变形量(图4仅显示了平移关系),所以主动抛光盘面的变形量是点划线和实线之间的差,而测量值是实线和虚线之间的差。

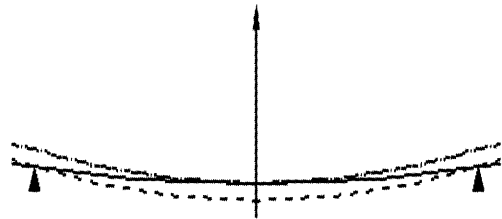


图4 盘面变形后,测量量和变形量之间的平移关系
Fig. 4 The moving relationship between deforming and measuring

图5为 $X_1=365\text{ mm}$ 时的主动抛光盘的变形图(离轴抛物面),由图中可知它是关于 X 轴($Y=0$)对称的形状,但是在 Y 方向的最大变形量只有一 X 方向(盘面上最靠近镜面中心的方向)的一半左右,而盘面 $-X$ 方向的变形量也只有 $+X$ 方向(盘面上最靠近镜面边缘的方向)的一半左右,也就是说,盘面变形后是一个非中心对称的图形,因而无论怎么将主动抛光盘放到LVDT测试架上(主动抛光盘中心与LVDT测试架的中心重合), $\phi 400\text{ mm}$ 圆上三个均布的定位点与此非球面接触时,不可能在图5的变形量相同的同一个变形带上,所以主动抛光盘面就会倾斜,实际上LVDT所测得的值,相当于用此三定点所确定的平面去截此变形曲面,所得到的偏差为变形曲面距此平面的距离。图6为均布的三个定位点在图5的变形盘面上每间隔 15° 移动放置后所得到的测量曲面。

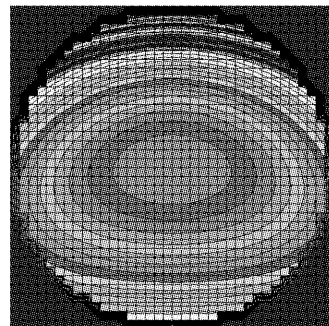


图5 主动抛光盘在 $X_1=365\text{ mm}$ 处,盘面的变形图
Fig. 5 Deforming map of lap on $X_1=365\text{ mm}$

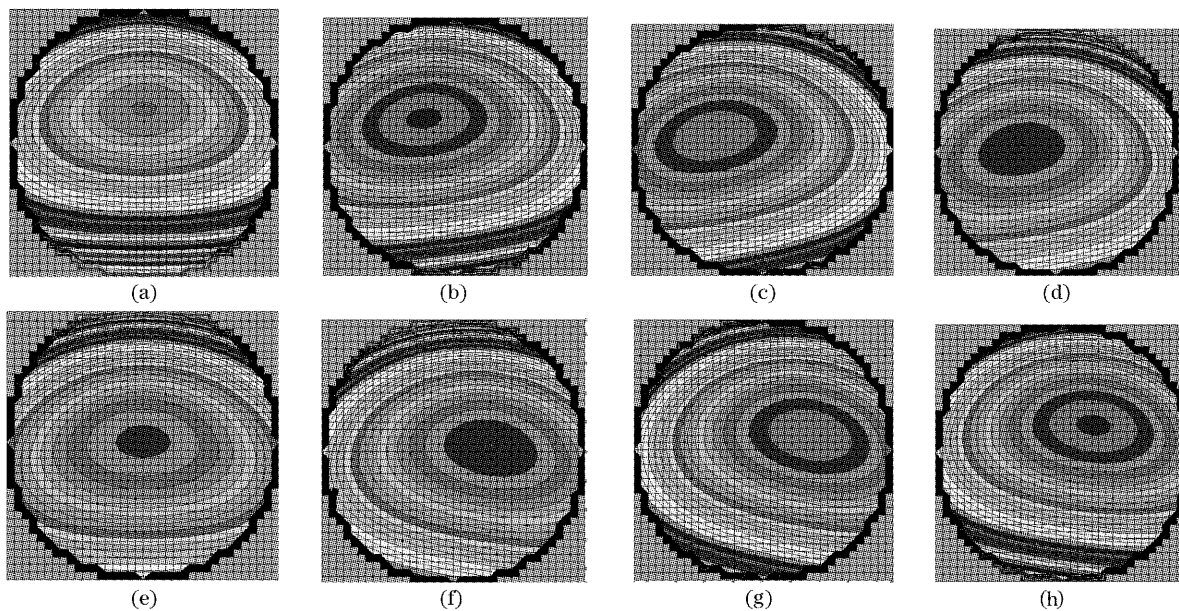


图 6 在 $X_1=365\text{ mm}$, 主动抛光盘旋转到不同角度时盘面变形, 在三个固定支撑点上(随盘旋转)所测量得到的图形。

(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=15^\circ$, (c) $\theta=30^\circ$, (d) $\theta=45^\circ$, (e) $\theta=60^\circ$, (f) $\theta=75^\circ$, (g) $\theta=90^\circ$, (h) $\theta=105^\circ$,

Fig. 6 Measured contour map, $X_1=365\text{mm}$ on different rotation angle of Lap on measuring shelf, after deforming

(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=15^\circ$, (c) $\theta=30^\circ$, (d) $\theta=45^\circ$, (e) $\theta=60^\circ$, (f) $\theta=75^\circ$, (g) $\theta=90^\circ$, (h) $\theta=105^\circ$,

6 盘面变形及升降的运动规律

图 7、图 8 是主动抛光盘的中心从偏离镜面中心 45mm 运动到 365mm 时盘的变形(正面)和提升(背面)的状况以及运动规律, 在这个过程中, 我们选取 $V_1=0.4\text{ mm/s}$, 这样主动抛光盘从中心 ($X_0=45\text{ mm}$) 到边缘 ($X_{\text{border}}=365\text{ mm}$) 要走 800 s, 我们又选取 $V_2=1.5\text{ r/min}$, 即 40 s 钟主动抛光盘旋转

一圈, 我们选取 10 s 显示一次, 即主动抛光盘旋转一圈显示 4 个点。从这些图上我们可以看到主轴在横梁上一个运动过程中, 主动抛光盘的变形和提升, 运动的速度和加速度, 以及精确变形和近似变形之间的微小差异。这是主轴在整个横梁的一个运动周期内宏观的分析图。而图 9、图 10 显示了主动抛光盘中心在 $X_1=365\text{ mm}$ 时, $V_1=0, V_2=1.5\text{ r/min}$

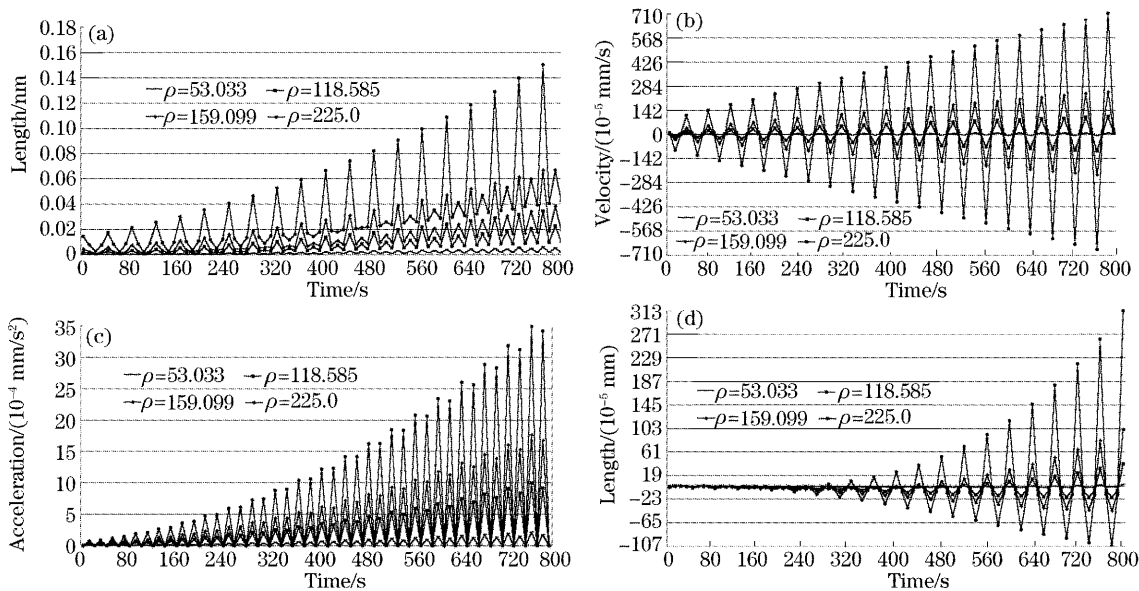


图 7 主动抛光盘沿镜面径向运动且同时旋转时, 其表面上不同径向位置 4 点上的变形特性

Fig. 7 Deforming quantity of lap surface on 4 points, when lap moving along crossbeam and spinning itself

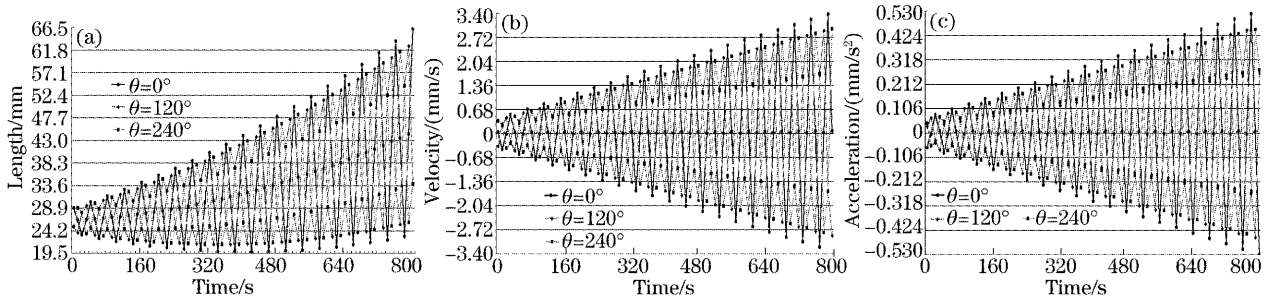


图 8 主动抛光盘沿镜面径向运动且同时旋转时,其背面上 3 个提升点的运动特性

Fig. 8 Moving feature of lap back on 3 hoisting points, when lap moving along crossbeam and spinning itself

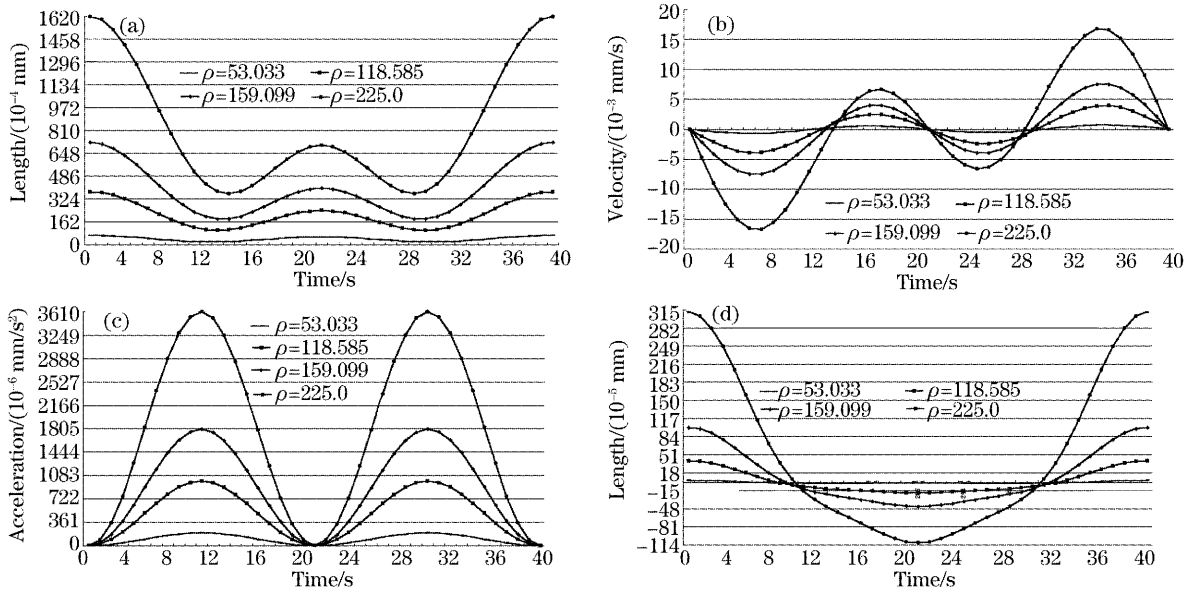


图 9 主动抛光盘在 $X_1 = 365$ mm 位置旋转一周时,在径向不同位置 4 点上的变形特性

Fig. 9 Deforming feature on 4 points of lap surface, when lap on $X_1 = 365$ mm, spinning itself one circle

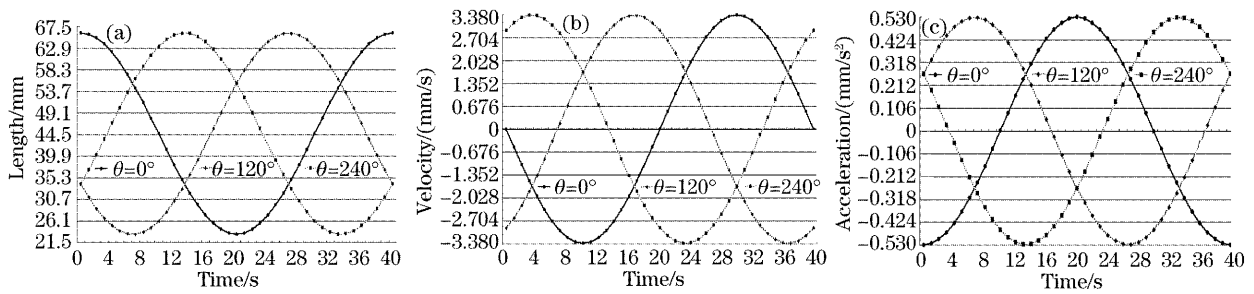


图 10 主动抛光盘在 $X = 365$ mm 位置时旋转一周时,其背面三提升点的运动特性

Fig. 10 Moving feature of lap back on 3 hoisting points, when lap on $X = 365$ mm, spinning itself one circle

时的与图 7 和图 8 相对应的图形,不过这是在主动抛光盘一个旋转周期内局部的分析图。

图 7(a)和图 9(a)是由(5)式计算出来的盘正面上 4 点(3 个位于 LVDT 的 3 个测量圈上,一个位于主动抛光盘的边缘)的变形状况;图 7(b)和图 9(b)是由(6)式计算出来的同样 4 点的变形速度;图 7(c)和图 9(c)是由(7)式计算出来的同样 4 点的变形加速

度。图 7(d)和图 9(d)是由(12)式计算出来的近似变形公式相对于精确变形公式的差。图 8(a)和图 10(a)是根据(8)式计算出来的,盘背面上均布三提升点的高度位置变化图;图 8(b)和图 10(b)是根据(9)式计算出来的同样三点的运动速度;由图 9(d)可知,盘面变形的精确公式与近似公式之间的差与盘面变形的量级相比,相差近两个数量级,因而(8)式~

(10)式已经能很好地代表了盘面的变形运动状况。从以上的图中,我们还能发现无论是盘的变形量大小,还是盘的提升位置差大小,以及他们的速度、加速度大小,都是随着主动抛光盘远离镜面中心而逐渐增大;而且它们的变化周期与主动抛光盘的旋转周期相一致。因而,在最边缘($X_1 = 365$ mm)的一个周期内,就能反映出主动抛光盘的最大的变形/提升的速度和加速度(这是设计电控线路时应考虑的问题);以及主动抛光盘的最大的变形量(正面)和最大的高度位置差(背面),这也就是主动抛光盘的提升机构应该具备的最小提升量。

由图 10(a)可知盘背面的三提升点的最高位置为 66.1 mm,最低为 23.2 mm,即在一个旋转周期内在三个提升点上,最大的高度差为 42.9 mm。而由图 8(a)可知,当 $X_1 = 212$ mm 左右时盘背面的三提升点最低可达 19.8 mm,因而当主轴在横梁的整个运动周期内盘背面在三提升点的最大提升量应大于 46.3 mm(数学上的最小理论值)。而盘变形/提升的速度、加速度还与主动抛光盘自身的移动速度 V_1 和旋转速度 V_2 有关,而这中间起决定作用的是盘的旋转速度 V_2 。

由图 8 可知,当主轴在横梁上由中心向边缘运动时,其中心点的高度逐渐上升,盘面越来越倾斜,再结合看图 10,三提升点的运动轨迹,速度和加速度的变化轨迹都是以盘面的旋转周期为周期的类似正弦曲线的曲线。

表 1 在一个旋转周期内盘面变形的最大速度、加速度与径向速度 V_1 , 主轴速度 V_2 的关系

Table 1 The Relationship between maximum deforming velocity and acceleration of lap surface vs V_1 and V_2 , on one circle, $X_1 = 365$ mm

$V_2 / (\text{r/min}) \backslash V_1 / (\text{mm/s})$		0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	2.5	5
		0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	2.5	5
0.5	velocity	0.005567	0.005562	0.005563	0.005598	0.005530	0.005740	0.006205
	acceleration	0.0003916	0.0003808	0.0003578	0.0003073	0.0002546	0.0002405	0.0002361
1	velocity	0.011140	0.011135	0.011125	0.011125	0.011161	0.011267	0.011481
	acceleration	0.0015838	0.0015631	0.0015199	0.0014277	0.0013291	0.0009895	0.0004112
1.5	velocity	0.016712	0.016707	0.016697	0.016677	0.016688	0.016802	0.0169898
	acceleration	0.0035775	0.0035468	0.0034837	0.0033512	0.0032111	0.0027171	0.0017504
3	velocity	0.033429	0.033424	0.033415	0.033395	0.033374	0.033385	0.033604
	acceleration	0.0143671	0.0143066	0.0141839	0.0139316	0.0136706	0.0127689	0.0108652
6	velocity	0.066864	0.066859	0.066849	0.066829	0.066809	0.066743	0.066770
	acceleration	0.0575849	0.0574649	0.057223	0.0567323	0.0562322	0.0545460	0.0510724
12	velocity	0.133732	0.133727	0.133717	0.133698	0.133678	0.133614	0.133487
	acceleration	0.2305754	0.2303364	0.2298564	0.2288892	0.2279124	0.2246730	0.218181
24	velocity	0.267469	0.267464	0.267454	0.267435	0.267415	0.267351	0.267227
	acceleration	0.9227755	0.9222983	0.9213421	0.9194223	0.9174927	0.9111550	0.8986886

由图 7(a)可知,在盘面的一个旋转周期内,盘面的变形当主轴在 230 mm 左右以内时呈现 V 型,以外时呈现 W 型,其变形量也随着主轴向外的移动而逐渐变大,再结合看图 9(a)可知盘面的最大变形量(盘边缘)为 0.162 mm,而在最外圈的传感器上为 0.0727 mm。

由图 7(d)知,近似变形相对于精确变形的误差,也随着主轴向镜边缘的移动而逐渐增大,结合图 9(d)可知,变形的精确公式和近似公式之间最大的偏差为 0.00312 mm(盘边缘),而在最外圈的传感器上为 0.00100 mm,这已达到 LVDT 的测量精度极限,所以更进一步证明:(5)式~(7)式已经能很好地代表盘面的变形及运动状况。

由图 7(b)、图 7(c)知:盘面的变形速度和加速度也是随着主轴向镜边缘的移动而逐渐增大,结合图 9(b)、图 9(c)可知,其变化的周期二倍于盘面的转速;速度曲线类似于正弦曲线,双边震荡,而加速度曲线类似于滤波曲线。

表 1 给出了主动抛光盘中心在离镜面中心的最边缘范围内($X_1 \leq 365$ mm),主动抛光盘在一个旋转周期内,在各种速度组合下的盘面变形的最大速度和加速度。而表 2 给出了在同样条件下,盘背面在三个提升点的位置上的提升的最大速度和加速度。由此二表和机械与电控的设计,我们可以确定我们在加工过程中可以选取的最大主轴的旋转速度。

表 2 在一个旋转周期内盘背面提升下降的最大速度、加速度与径向速度 V_1 , 主轴速度 V_2 的关系
 Table 2 The Relationship between maximum moving velocity and acceleration of lap back on 3 hoist points
 and V_1 vs V_2 , on one circle, $X_1=365$ mm

$V_2/(r/min)$		$V_1/(mm/s)$						
		0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	2.5	5
0.5	velocity	1.123388	1.124215	1.125360	1.127740	1.133664	1.154683	1.337348
	acceleration	0.0587655	0.0587572	0.0587242	0.0585923	0.0583723	0.0581556	0.0676105
1	velocity	2.24582	2.246776	2.248431	2.250720	2.251647	2.268466	2.309367
	acceleration	0.2350701	0.2350619	0.2350289	0.234897	0.234677	0.2333546	0.229177
1.5	velocity	3.368225	3.369223	3.37105	3.374018	3.376080	3.384981	3.415422
	acceleration	0.5289112	0.5289030	0.5288700	0.5287380	0.5285181	0.5271957	0.5220407
3	velocity	6.735411	6.736451	6.738446	6.742097	6.745293	6.752547	6.769962
	acceleration	2.1156532	2.1156450	2.1156120	2.1154800	2.115260	2.1139377	2.1087827
6	velocity	13.469759	13.472821	13.472902	13.476892	13.480656	13.491321	13.505094
	acceleration	8.4626211	8.4626128	8.4625800	8.4624479	8.4622280	8.4609056	8.4557506
12	velocity	26.938447	26.939519	26.941642	26.945803	26.949851	26.962221	26.982642
	acceleration	33.8504926	33.8504843	33.8504513	33.8503194	33.8500995	33.8487771	33.8436222
24	velocity	53.875816	53.876894	53.879038	53.883284	53.887473	53.900697	53.924443
	acceleration	135.401978	135.401970	135.401937	135.401805	135.401585	135.400263	135.395108

比较表 1 和表 2 可知,在同样的转速组合下提升的速度和加速度分别是变形的速度和加速度的 200 倍和 150 倍左右,然而变形的精度要求要大大高于提升的精度要求,即变形的精度要优于 0.001 mm 量级,而提升的精度可以只达到 0.01 mm 以上,甚至 0.1 mm(因为还要用恒压控制来修正完成最后的提升量)。

从两个表中还可以看出,提升与变形的速度和加速度的变化主要取决于主动抛光盘面的旋转速度,而主轴在横梁上的移动速度对其的影响要小得多。从提升与变形的速度和加速度考虑,主动抛光盘的旋转速度不宜大于 6 r/min,主轴在横梁上的移

动速度不宜大于 2.5 mm/s。

参 考 文 献

- 1 D. D. Walker, R. G. Bingham, D. Brooks *et al.*. The production of highly aspheric secondary mirrors using active laps[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(7): 215~218
- 2 H. M. Martin, R. G. Allen, J. H. Burge *et al.*. Fabrication of mirrors for the magellan telescopes and large binocular telescope [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4837**: 8094~8100
- 3 Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing thechnology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407 (in Chinese)
 崔向群,高必烈,汪达兴等.一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407